



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ Patentschrift
⑩ DE 197 38 480 C 1

⑤1 Int. Cl.⁶:
G 01 B 11/24
G 01 B 11/30
G 06 T 17/00
G 06 K 9/46

②1 Aktenzeichen: 197 38 480.3-52
②2 Anmeldetag: 3. 9. 97
④3 Offenlegungstag: -
④5 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 26. 11. 98

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦3 Patentinhaber:
Mähner, Bernward, 83607 Holzkirchen, DE

⑦2 Erfinder:
gleich Patentinhaber

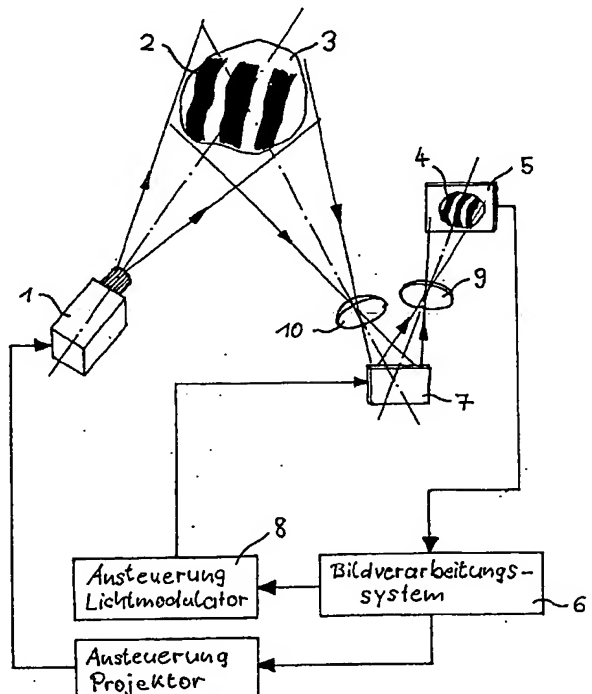
⑤5 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

US 49 91 968
US 42 12 073

NL-Z.: LEHMANN, M.: Optimization of wavefield
intensities in phase-shifting speckle interfero-
metry, in: Optics Communications
118(1995)199-206;

⑤4 Verfahren und Einrichtung zur optischen Vermessung von Objekten

⑤7 Bei optischen, flächenhaft arbeitenden Meßverfahren kann meist nur ein Bruchteil der Kameradynamik zur Auflösung der das Meßsignal tragenden Intensitätsmodulation genützt werden, da die dem Meßsignal überlagerte Hintergrundintensität einer ortsabhängigen Schwankung unterliegt. Das neue Verfahren ist gegen Unterschiede der Hintergrundintensität weitgehend unempfindlich. In den Strahlengang zwischen Objekt und der beobachtenden Kamera wird ein Filter eingesetzt, um Bildbereiche, die zu hell sind, abzdunkeln während dunkle Bildbereiche nicht oder nur geringfügig abgedunkelt werden. Dieser läßt sich dynamisch an die vorliegenden Lichtverhältnisse anpassen, ohne dabei das Meßsignal zu verfälschen. Hierdurch kann die Gesamthelligkeit bei der Ausleuchtung durch die Projektionseinheit erhöht oder die Lichtempfindlichkeit der Kamera gesteigert werden. Die durch Streifenprojektion oder Phasenlagenänderung erzeugte Intensitätsmodulation kann nun mit maximaler Amplitude aufgetragen werden, d. h. die Dynamik der Kamera wird nun ausschließlich zur Messung der Intensitätsmodulation genützt, womit eine lückenlose Auswertung bei gleichzeitig optimalem Signal-/Rausch-Verhältnis erreicht wird.



DE 197 38 480 C 1

Die Erfindung betrifft Verfahren und Einrichtung zur optischen Vermessung von Objekten. Es gibt mittlerweile eine Reihe von optischen Meßverfahren, die durch Projektion von Lichtmustern, welche in der Regel mit einer Videokamera aufgezeichnet werden, die flächenhafte Berechnung von 3-dimensionalen Verschiebungs- und Konturdaten ermöglichen. Zu diesen Verfahren gehören beispielsweise die 3D Konturvermessung mittels projizierter Streifen oder die Verschiebungs- und Dehnungsmessung mittels der Speckle Interferometrie oder die Mehrfachpuls-Holografie. Zur Berechnung der 3-dimensionalen Gestalt eines Objektes oder des Verschiebungs- bzw. Dehnungsfeldes wird hierbei ein digitales Bildverarbeitungssystem verwendet, das aus ein oder mehreren Kamerabildern die gewünschten Ergebnisdaten berechnet. Bei der Auswertung der aufprojizierten Streifen- bzw. Specklemuster wird dabei entweder unterschieden, ob die am gerade betrachteten Bildpunkt auftreffende Linie im gerade betrachteten Bild hell- oder dunkelgeschaltet ist (Beispiel CLA-Verfahren (CLA: coded light approach)), oder es wird, unter Annahme einer sinusförmigen Intensitätsmodulation der auftreffenden Linie oder des auftreffenden Speckles, die im gerade betrachteten Bild vorliegende Phasenlage bestimmt (Beispiel Phasenshiftverfahren). Als Rechenverfahren kommen Streifenidentifikationsverfahren (T. G. Stahs, F. M. Wahl, "Close Range Photogrammetry Meets Machine Vision", SPIE Vol. 1395 (1990) S. 496 503) oder Phasenshift-Verfahren (W. Osten, "Digitale Verarbeitung und Auswertung von Interferenzbildern", Kap. 6. Akademie Verlag ISBN 3-05-501294-1) zum Einsatz. Die in den Kamerabildern, welche innerhalb einer Meßbildsequenz aufgenommen werden, vorhandene Bildinformation setzt sich zusammen aus einem Anteil an gleichbleibender Helligkeitsinformation durch hell/dunkel-Kontraste auf der Objektoberfläche, Umgebungslicht usw., die als Hintergrundintensität bezeichnet wird, und einem Anteil an gezielt modulierter Lichtintensität, die durch unterschiedliche optische Gitter oder eine Phasenschiebeeinheit erzeugt wird. Die in den Bildern vorliegende Information über die Hintergrundintensität wird bei diesen Auswertungsverfahren ausnahmslos rechnerisch beseitigt und die Amplitude der Intensitätsmodulation normiert.

Folglich ist bei diesen Meßverfahren weder die Hintergrundintensität noch die Amplitude der Intensitätsmodulation von Interesse.

Der Erfindung liegt das Problem zugrunde, daß bei den oben genannten Meßverfahren die aufprojizierten Streifen- bzw. Specklemuster, aus denen die Meßdaten gewonnen werden, über den gesamten Bildsensor betrachtet, häufig weder in ihrer Intensitätsamplitude noch in ihrer Hintergrundintensität konstant sind. Als Ursachen hierfür sind die variablen Reflexionseigenschaften der beobachteten Objekte, die ungewollt ungleichmäßige Ausleuchtung der Szenerie durch die Projektionseinheit und die Einflüsse des Umgebungslichtes zu nennen. Je höher dabei die Dynamik der Hintergrundintensität ist, desto geringer muß die Amplitude der überlagerten Intensitätsmodulation durch Streifen- bzw. Specklemuster sein, damit das Kamerabild während der Aufnahme der Meßbildsequenz weder Übersteuerungen noch Unterbelichtungen aufweist. Es ist offensichtlich, daß sich mit relativ zur Hintergrundintensität kleiner werdender Amplitude der Intensitätsmodulation das Signal/Rausch-Verhältnis zunehmend verschlechtert. Mit anderen Worten: je ungleichmäßiger die Helligkeitsverteilung auf dem mit der Kamera beobachteten Objekt ist, desto schlechter ist die Qualität der Ergebnisdaten. Übersteigt die Dynamik der Hintergrundintensität bereits den Dynamikbereich der Ka-

mera, so ist eine lückenlose Auswertung bisher generell unmöglich.

Um eine möglichst gleichmäßige Helligkeit der zu vermessenden Objekte im Kamerabild zu erzielen, werden diese üblicherweise weiß eingefärbt. Hiermit lassen sich die Probleme beseitigen, die man sonst mit einem wie auch immer gearteten Farbmuster auf der Objektoberfläche bei der Aufnahme der Meßwertbilder hätte. Diese Maßnahme kann jedoch zur Beschädigung der Objektoberfläche führen und erfordert in jedem Fall eine nachträgliche Reinigung, die insbesondere bei Serienprüfungen unzumutbar sein kann. Ferner wird durch das Einfärben des Objektes eine in der Praxis fast immer vorhandene ungleichmäßige Ausleuchtung des Objektes durch die Projektionseinheit nicht ausgeglichen. Für viele Anwendungen (z. B. 3D-Vermessung von Gesichtern oder Kunstgegenständen) ist außerdem der Erhalt der Originalfarbgebung des Objektes erwünscht, d. h. man will die Originalfarbgebung zusammen mit den Meßdaten aufnehmen um später z. B. zu Animationszwecken 3D Kontur und Farbe überlagern zu können.

Die Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren und eine Einrichtung zur intensitätsmodulierenden optischen Messung anzugeben, welche gegen Unterschiede der Hintergrundintensität weitgehend unempfindlich sind. Diese Aufgabe wird durch das in Patentanspruch 1 aufgeführte Verfahren und die in Anspruch 7 angegebene Einrichtung gelöst. Es werden hiermit sowohl die örtlichen Schwankungen der Hintergrundintensität als auch unterschiedlich hohe Intensitätsamplituden optisch eliminiert. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den jeweiligen Unteransprüchen angegeben.

Erfindungsgemäß wird in den Strahlengang zwischen Objekt und der beobachtenden Kamera ein Filter eingesetzt, um Bildbereiche, die zu hell sind, abzdunkeln während dunkle Bildbereiche nicht oder nur geringfügig abgedunkelt werden. Durch diese Maßnahme wird erreicht, daß sowohl die Hintergrundintensität als auch die Intensitätsamplitude in hellen Bereichen abgeschwächt und damit denen in den dunkleren Bildbereichen angeglichen werden. Hierdurch kann die Gesamthelligkeit bei der Ausleuchtung durch die Projektionseinheit erhöht und / oder die Lichtempfindlichkeit der Kamera gesteigert werden, ohne daß Übersteuerungen in den zuvor, d. h. bei voll lichtdurchlässigem Filter, hellen Bildbereichen auftreten.

Gemäß einem Aspekt der Erfindung wird das Filter in Form eines Lichtmodulators als Matrix mit $n \times m$ in ihrer Lichtdurchlässigkeit unabhängig voneinander einstellbaren Elementen eingebracht. Dadurch kann das Intensitätenfilter dynamisch an die vorliegenden Lichtverhältnisse angepaßt werden. Für die geometrische Anordnung von Bildsensor und Lichtmodulator wurden bereits mehrere Lösungen beschrieben, z. B. in den Patentschriften DE 43 05 807 A1 oder DE 44 20 637 A1, und sie muß daher nicht in allen Details beschrieben werden. Neben der hier ausnahmslos vorgeschlagenen Verwendung von LCD-Panels können auch Mikro-Spiegel-Modulatoren (MMD: micro-mirror-device) verwendet werden, bei denen die unerwünscht hohen Lichtverluste der mit Polarisationsfiltern arbeitenden LCD-Panels vermieden werden.

Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung wird die Berechnung der Intensitätsabschwächung auf Basis eines Bildes durchgeführt, welches nur die Hintergrundintensität enthält, so daß durch die Hintereinanderschaltung von Objekt und Lichtmodulator eine vollständige Elimination der Schwankungen der Hintergrundintensität auf dem Bildsensor der Kamera erfolgt. Hierdurch wird eine optimale Wirkung erzielt.

Vorteilhafterweise wird die Aufnahme aller zur Messung

gehörenden Intensitätsbilder dann mit der zuvor berechneten und eingestellten Intensitätsabschwächung durchgeführt, wobei diese nicht mehr verändert wird. Hierdurch wird die Einhaltung einer konstanten Hintergrundintensität sichergestellt, die eine Grundbedingung für die Anwendbarkeit des Eingangs erwähnten Berechnungsverfahrens darstellt.

Mit der Erfindung ist somit eine Möglichkeit geschaffen, die unerwünschten örtlichen Schwankungen der Hintergrundintensität optisch zu beseitigen und gleichzeitig die Intensitätsamplitude der Projektionseinrichtung für alle untersuchten Bildpunkte anzugleichen. Dadurch kann die durch Streifenprojektion oder Phasenlagenänderung erzeugte Intensitätsmodulation nun mit maximaler Amplitude aufgetragen werden, d. h. die Dynamik der Kamera wird nun ausschließlich zur Messung der Intensitätsmodulation genützt, womit eine lückenlose Auswertung bei gleichzeitig optimalem Signal/Rausch-Verhältnis erreicht wird.

Im Folgenden wird ein Ausführungsbeispiel der Erfindung anhand der Fig. 1 erläutert. Die Fig. 1 zeigt eine vereinfachte schematische Darstellung einer Einrichtung zur optischen Vermessung von Objekten gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung. Eine Einrichtung zur optischen Vermessung eines Objektes 3 enthält eine Projektionseinrichtung 1, mit der ein Lichtmuster 2 auf dem zu vermessenden Objekt 3 erzeugt wird. Mittels einer Optik 9 wird eine Abb. 4 des auf das Objekt projizierten Lichtmusters auf einem Bildsensor 5 erzeugt. Optik 9 und Bildsensor 5 können Bestandteile einer Kamera bzw. Videokamera sein. Mittels einer Auswerteeinheit 6 wird aus der Abbildung des projizierten Lichtmusters 2 die Oberflächenkontur des zu vermessenden Objekts 3 berechnet. Die Auswerteeinheit 6 kann in einem Mikrocomputer eines optischen Bildverarbeitungssystems bestehen.

Ein als optisches Filterelement 7 dienender Lichtmodulator ist als Array von intensitätsabschwächenden Elementen ausgebildet und zwischen dem Objekt 3 und dem Bildsensor 5 geschaltet und läßt eine möglichst feinstufige, voneinander unabhängige und gegebenenfalls voneinander verschiedene Abschwächung der von verschiedenen Oberflächenpunkten des betrachteten Objektes ausgehenden Strahlenbündel zu. Die Ansteuerung des Lichtmodulators 7 erfolgt mittels einer elektronischen Schaltung 8, welche die Erzeugung bzw. Anzeige von beliebigen Abblendmustern mittels des Lichtmodulators 7 ermöglicht und in der Lage ist, diese während der Aufnahme beliebig vieler Kamerabilder ununterbrochen unverändert beizubehalten. Hierzu ist beispielsweise die Verwendung einer zur Auflösung des Lichtmodulators 7 passenden Computer-Grafikkarte denkbar. Ist der Lichtmodulator 7, wie in Fig. 1 dargestellt, als Mikro-Spiegel-Modulator ausgebildet, so wird ferner eine Optik 10 zur Erzeugung einer Zwischenabbildung des Objektes 3 auf dem Lichtmodulator 7 verwendet.

Die Aufnahme des Referenzbildes zur Berechnung des mit dem Lichtmodulator 7 zu erzeugenden Abblendmusters erfolgt zweckmäßigerweise bei voll durchlässigem Modulator. Dabei wird bei der Wahl der Objektiveblende und der Belichtungszeit bzw. der Ausleuchtung der Szenerie so vorgegangen, daß die dunkelsten Bereiche ausreichend hell abgebildet werden. Danach kann ein zum Referenzbild negatives Abblendmuster berechnet und mit dem Lichtmodulator 7 dargestellt werden, das die Dynamik des Hintergrundbildes vollständig kompensiert oder zumindest unter einen bestimmten Schwellwert verkleinert. Zur Berechnung des mittels des Lichtmodulators 7 zu erzeugenden Abblendmusters bedient man sich zweckmäßigerweise der zur Meßdatenerfassung und -auswertung ohnehin erforderlichen Kamera und des daran angeschlossenen Bildverarbeitungssystems.

Patentansprüche

1. Verfahren zur optischen Vermessung von Objekten, bei dem Lichtmuster auf das zu vermessende Objekt projiziert werden, Abbildungen von den auf das zu vermessende Objekt projizierten Lichtmustern erzeugt werden, und aus den erzeugten Abbildungen die Oberflächenkontur, die Verschiebung oder der Spannungs-/Dehnungszustand des Objektes berechnet wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß zwischen dem aufzunehmenden Objekt und den Abbildungen eine optische Filterung vorgenommen wird, welche die von verschiedenen Objektpunkten ausgehenden Strahlenbündel unabhängig und gegebenenfalls verschieden voneinander in ihrer Intensität so abschwächt, daß die örtliche Schwankung der resultierenden Hintergrundintensität gegenüber Abbildungen ohne diese Filterung verkleinert wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die optische Filterung während der Messung nicht verändert wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Filterung durch ein Array von unabhängig voneinander einstellbaren Intensitätsabschwächern oder Mikroblenden erfolgt, welches über eine elektronische Steuerung dynamisch an die vorliegenden Lichtverhältnisse angepaßt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Berechnung der mit der Filterung zu erzeugenden bündelweisen Intensitätsabschwächung auf Basis der mit einer Meßbildkamera aufgenommenen Bilder und unter Verwendung eines digital arbeitenden Bildverarbeitungssystems erfolgt.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Berechnung der mit der Filterung zu erzeugenden bündelweisen Intensitätsabschwächung mithilfe desselben Bildverarbeitungssystems erfolgt, das auch zur Messung verwendet wird.
6. Verfahren nach Anspruch 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Filterung mittels einer Matrix von Miniaturspiegeln (micro mirror device) erfolgt.
7. Einrichtung zur optischen Vermessung von Objekten mit einer Projektionseinrichtung (1) zur Erzeugung von Lichtmustern (2) auf dem zu vermessenden Objekt (3), einer Optik (9) zur Erzeugung von Abbildungen (4) der auf das Objekt projizierten Lichtmuster (2) auf einen Bildsensor (5), und einer Auswerteeinheit (6) zur Berechnung der Oberflächenkontur, der Verschiebung oder des Spannungs-/Dehnungszustandes des zu vermessenden Objektes (3) aus den erzeugten Abbildungen (4), **dadurch gekennzeichnet**, daß ein optisches Filterelement (7) zwischen dem aufzunehmenden Objekt und dem Bildsensor (5) eingefügt ist, welches die von verschiedenen Objektpunkten ausgehenden Strahlenbündel unabhängig und gegebenenfalls verschieden voneinander in ihrer Intensität so abschwächt, daß die örtliche Schwankung der resultierenden Hintergrundintensität auf dem Bildsensor (5) gegenüber Aufnahmen ohne dieses Filterelement (7) verkleinert wird.
8. Einrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Filterelement (7) als Array von unabhängig voneinander einstellbaren Intensitätsabschwächern oder Mikroblenden ausgebildet ist, welches über eine elektronische Steuerung (8) dynamisch an die vorliegenden Lichtverhältnisse angepaßt wird.
9. Einrichtung nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Berechnung der mit dem Filter-

element (7) zu erzeugenden bündelweisen Intensitätsabschwächung auf Basis der mit einer Meßbildkamera aufgenommenen Bilder und unter Verwendung eines digital arbeitenden Bildverarbeitungssystems erfolgt.

10. Einrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Berechnung der mit dem Filterelement (7) zu erzeugenden bündelweisen Intensitätsabschwächung mithilfe derselben Auswerteeinrichtung (6) des Bildverarbeitungssystems erfolgt, das auch zur Auswertung der Meßbilder verwendet wird.

11. Einrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß das Filterelement (7) in Form einer Matrix von Miniaturspiegeln (micro mirror device) ausgebildet ist.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

Fig. 1

